

Positionspapier der AG-Spiroergometrie zu ventilatorischen und Laktatschwellen.

M. Westhoff, B. Lehnigk, K.-H. Rühle, A. Greiwing, R. Schomaker, H. Eschenbacher, M. Siepmann

1. Einleitung

Die leistungsdiagnostischen Verfahren der Spiroergometrie und der Laktatdiagnostik ermöglichen eine indirekte Differenzierung der Energiebereitstellung des Menschen und Analyse der kardiorespiratorischen Antworten auf metabolische Prozesse unter Belastungsbedingungen. Bei niedrigen Belastungen erfolgt die Energiebereitstellung zum großen Teil über aerobe Stoffwechselwege. Bei höheren Belastungen erhöht sich der durch anaerobe Glykolyse gewonnene Anteil der Energiebereitstellung (Röcker, Prettin, Pottgiesser, Schuhmacher, & Dickhuth, 2010 - [17]). Eine Einteilung in die Belastungsbereiche aerob, aerob-anaerob und anaerob ist üblich und aus trainingsmethodischer Sicht durchaus sinnvoll, entspricht allerdings nicht den physiologischen Gegebenheiten. Selbst in Ruhe erfolgt die Energiebereitstellung teilweise anaerob und auch bei länger andauernden Belastungen mit Laktatwerten von 6 mmol/l wird ein großer Anteil der Energiebereitstellung über aerobe Stoffwechselwege realisiert (Antonutto 1995 [36], Hottenrott & Neumann, 2008 - [25]).

Auf den jeweiligen Übergängen metabolischer Prozesse mit messbaren Veränderungen des Laktatpiegels basiert das sog. Laktat-Schwellenkonzept. Die metabolischen Prozesse im Verlauf einer Belastung führen außerdem zu entsprechenden Veränderungen und schwellenartigen Übergängen im Ventilationsmuster. Diese werden im Rahmen der Spiroergometrie anhand spezifischer ventilatorischer Parameter erkannt und demnach auch als ventilatorisch definierte Schwellen bezeichnet. Wenngleich eine kausale Verknüpfung besteht, so ist die Vergleichbarkeit metabolischer und ventilatorischer Antworten auf eine Belastung durchaus komplex.

Schwellen sind in der Spiroergometrie für die Leistungsbemessung bei schwierig zu beurteilender Kooperation bzw. Motivation im Rahmen einer Belastungsuntersuchung, zur Trainingssteuerung, in der Transplantationsplanung, der Operabilitätsbeurteilung und der Begutachtung erforderlich.

Allerdings besteht in der Literatur eine kaum übersehbare Vielfalt von Schwellenterminologien, die einen Vergleich von Protokollen und Studien nur schwer möglich machen und auch im Alltag der Spiroergometrieinterpretation bzw. -auswertung zu mitunter erheblichen – terminologischen - Unsicherheiten führen.

Dies hat in der AG Spiroergometrie zu vielfältigen Diskussionen geführt, aus denen heraus die Notwendigkeit gesehen wurde, eine Festlegung der Schwellendefinitionen vorzunehmen und zu benennen, wie die Schwellen zu bestimmen sind. Dabei orientiert sich die Empfehlung an einer auch durch die Literatur unterstützte (Svedahl et al. [35]) Unterscheidung zwischen einer konzeptionellen und operationalen Schwellendefinition. Dies bedeutet, dass im ersten Schritt die Festlegung des Konzepts erfolgt wie Schwellen definiert sind bzw. werden, sei es als ventilatorische oder als Laktatschwelle. In einem zweiten Schritt erfolgt die operationale Definition, d.h. die Beschreibung der Methode, mit der die jeweilige Schwelle bestimmt wird, entweder über unterschiedliche ventilatorische (V-slope, Atemäquivalente) Parameter oder Bestimmungen der Laktatkinetik (MaxLass, Mader-Methode, Stegmann&Kindermann etc.).

2. Schwellenkonzepte

2.1. Laktatschwellen

Die Erfassung der Laktatkinetik ist seit fast 5 Jahrzehnten aus der Beurteilung der Ausdauerleistungsfähigkeit von Sportlern nicht mehr wegzudenken. Hierbei werden bei einem Labor- oder Feldtest mit einem stufenförmigen Belastungsanstieg die Laktatwerte im hyperämisierten Kapillarblut gemessen.

Das Hauptziel der Laktat-Leistungsdiagnostik ist die Bestimmung der Leistung bei dem sich Laktatproduktion und Laktatelimination gerade noch die Waage halten (Laufband –Laufbahn: m/s bzw. km/h, oder Fahrradergometer: Watt). Dieser Zustand wird als maximales Laktat-steady-state (maxLass oder MLSS) bezeichnet.

Für Laktat werden historisch zwei – in der Literatur mit einer Vielzahl unterschiedlicher Begriffe belegte – „Laktatschwellen“ beschrieben. Mittlerweile finden sich mehr als 60 Konzepte zu den Laktatschwellen. Diese betreffen prinzipiell den Beginn und das Ende des aerob-anaeroben Übergangs.

Hollmann et al. (1961 – [26]) beschrieben den ersten nichtlinearen Anstieg der Laktatkonzentration als Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung und zeigten ebenso wie Wasserman et al. (1964 – [32]) , der einem ersten Anstieg des Laktats über die Basalkonzentration die Begriffe „anaerobic threshold (AT)“ und „lactate threshold (LT)“ zuordnete, die Verknüpfung von Metabolismus und Ventilation auf.

Die erste Beschreibung einer zweiten Laktatschwelle erfolgte durch Mader et al. (12), der für das Ende des aerob-anaeroben Übergangs einen Laktatwert von 4 mmol festlegte. Die Problematik der Begrifflichkeiten zeigt sich darin, dass Mader et al. (12) zwar ebenfalls von einer aerob-anaeroben

Schwelle sprachen, diese aber für einen anderen – pathophysiologisch völlig anders begründeten - Laktatwert festsetzten.

Der von Keul et al. (1979 – [30]), sowie von Stegmann & Kindermann (1981 – [31]) eingeführte Begriff der individuellen anaeroben Schwelle (IAS) bezieht sich auf diese zweite Laktatschwelle und beschreibt pathophysiologisch richtig, dass es sich in diesem Übergangsbereich um einen Zeitpunkt bzw. eine Belastungsstufe handelt, an dem die maximale Eliminationsrate und die Diffusionsrate des Laktats im Gleichgewicht stehen. Die Tatsache, dass diese Schwelle als individuell bezeichnet wird, unterstreicht dass es sich nicht um einen fixen sondern individuell durchaus unterschiedlichen Wert handeln kann.

Die Charakterisierung der „Schwelle“ durch eine Gleichgewichtssituation von Produktion und Elimination von Laktat entspricht dem mittlerweile gängigen Begriff des maximalen Laktat-steady-state (maxLass oder MLSS) und wird der Dynamik des zugrundeliegenden Prozesses gerecht.

Unter Berücksichtigung der Laktatkinetik und den zugrundeliegenden pathobiochemischen bzw. metabolischen Prozessen sollte zur Vereinfachung der Terminologie der erste Anstieg der Laktatkonzentration als LT 1 und der zweite Anstieg der Laktatkonzentration – als Ausdruck des Endes des aerob-anaeroben Übergangs bzw. des maximalen Laktat-steady-state (maxLass oder MSLSS) – als LT 2 bezeichnet werden.

Die erste Schwelle LT1 spielt bisher im Rahmen der Laktat-Leistungsdiagnostik eine untergeordnete Rolle. Der der LT 1 zuzuordnende Laktatwert ist nicht nur individuell unterschiedlich sondern auch in Abhängigkeit vom Trainingszustand sowie vom Belastungsprotokoll variabel (3, 14, 15, 20, 21). Dies gilt gleichermaßen für den Laktatwert an der LT 2.

Eine systematische Überprüfung der Validität der gängigen Laktatschwellenmodelle zur Bestimmung des LT2 erfolgte 2010 in der Untersuchung von Dörr (2010 - [24]). Hierbei wurden die über die verschiedenen Modelle bestimmten Laktatschwellen-Leistungen mit den in mehreren Dauerleistungstests bestimmten Laktatschwellen-Leistungen verglichen.

Das IAS-Modell [Stegmann – [31]], das Dickhuth-Modell (34) und das Simon-Modell (33) erlaubten die beste Prognose des MLSS bzw. der LT 2. Allerdings ergaben sich auch bei diesen Modellen in 25-31% der Fälle praxisrelevante Differenzen zwischen den Schwellengeschwindigkeiten und der MLSS-Geschwindigkeit.

Insofern erscheint die von Skinner et al (1980 – [22]) vorgenommene Zuordnung fixer Laktatkonzentrationen von 2 mmol/l bzw. 4 mmol/l zu den beiden Schwellen des ersten (aerobic threshold – AT) bzw. zweiten Anstiegs der Laktatkonzentration (anaerobic threshold – AnAT) zwar hilfreich, wird der individuellen Laktatkinetik aber nicht unbedingt gerecht und muss in Anbetracht der individuellen, trainings- und belastungsprotokollspezifischen Variabilität, speziell der LT 2,

relativiert werden. Dies wird untermauert durch aktuelle Daten, die aufzeigen, dass die Laktatkinetik unter Belastung einem dynamischen Prozess unterliegt (Roecker K et al. 2010 [17]).

Dies hat zur Folge, dass neben einer individualisierten Betrachtung des Blutlaktats (7) mittlerweile eine vorsichtige Entwicklung vom reinen Laktatschwellenkonzept weg, hin zu einem Konzept stattfindet, das die Kombination der Verfahren favorisiert (2). So besteht zwar eine Kopplung von Laktatmetabolismus und Ventilation, aber gerade bei „kranken“ Patienten im Gegensatz zu gesunden Sportlern ist die Zuordnung von Laktatwerten und speziell Laktatschwellen zu ventilatorischen Veränderungen sowie ventilatorischen Schwellen erschwert (11). Auch die Zuordnung methodisch unterschiedlich bestimmter Laktatschwellen zu ventilatorischen Parametern variiert (Thomas et al. [19]). Hinzu kommt, dass die Kopplung der metabolischen Vorgänge mit den ventilatorischen Veränderungen trotz vielfältiger und plausibel erscheinender pathophysiologischer Erklärungen weiterhin eine „Black Box“ darstellt, insbesondere wenn zusätzlich berücksichtigt wird, dass Verschiebungen der jeweiligen Schwellen in Abhängigkeit vom Glykogenstatus auftreten (6, 7, 8, 16). Dörr (2010 - [24]) kommt in seiner Arbeit zu dem Schluss, dass die Kombination mehrerer leistungsdiagnostischer Verfahren (z. Bsp. Spiroergometrie – Laktat-Leistungsdiagnostik), einer alleinigen Erfassung der Laktat-Leistungskurve überlegen ist: „Die Messung der Laktatkonzentration während ansteigender Belastungen und insofern auch die Bestimmung und Verwendung von Laktatschwellen sollte dementsprechend zukünftig lediglich als zusätzlich erhobene Variable interpretiert und verwendet werden.“

2.2. Ventilatorische Schwellen

Basierend auf den Daten von Wasserman et al. (13) werden als ventilatorische Antwort auf die Stoffwechselfvorgänge unter einer inkrementalen Belastung ebenfalls zwei ventilatorische Schwellen definiert. Diese kennzeichnen ebenfalls den Beginn und das Ende des aerob-anaeroben Übergangsbereiches (Kindermann W – [29]), wobei dieser unterschiedlich lang sein kann. Dies gilt speziell in der Sportmedizin, wo sich zeigt, dass es sowohl individuelle aber auch sportartspezifische Unterschiede gibt. Die erste Schwelle ist bislang von Wasserman et al. (13) als anaerobe und die zweite Schwelle als respiratorischer Kompensationspunkt (RCP) bezeichnet worden.

Die Terminologie auch für die beiden ventilatorischen Schwellen ist mittlerweile nahezu unübersichtlich und verwirrend, da für dieselben Schwellen Begriffe wie „aerobe“ und „anaerobe“ Schwelle benutzt werden.

Demzufolge erscheint es sinnvoll, auch hier eine klare Benennung in Ventilatorische Schwelle 1 (VT 1) und Ventilatorische Schwelle 2 (VT 2) vorzunehmen. Dabei findet an der VT 1 eine Steigerung der Ventilation und der CO₂-Abgabe jeweils im Verhältnis zur Sauerstoffaufnahme aufgrund von

vermehrt anfallendem CO₂ aus der Laktatpufferung statt. Die VT 2 ist gekennzeichnet durch eine erkennbare respiratorische Kompensation einer im weiteren Verlauf der Belastung auftretenden metabolischen Azidose (22, 16).

Die wichtigsten pathophysiologischen Veränderungen an VT1 und VT2 sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

VT1	VT2
<ul style="list-style-type: none"> – Laktatanstieg mit Laktatpufferung <ul style="list-style-type: none"> ➤ Steigerung der Ventilation ➤ Steigerung der CO₂-Abgabe <p style="text-align: center;">im Verhältnis zur VO₂</p>	<ul style="list-style-type: none"> – Überschreiten des Laktat-steady-state <ul style="list-style-type: none"> ➤ Laktatexzess ➤ Metabolische Azidose ➤ Überproportionale Steigerung der Ventilation (V_E / VCO₂)

Tabelle 1: Pathophysiologische Veränderungen an VT1 und VT2.

3. Bestimmung der ventilatorischen Schwellen

3.1. VT 1

Die VT 1 wird vorzugsweise über die V-slope-Methode, die VE/VO₂-Kurve und die PETO₂-Kurve, d.h. nach der Wasserman 9-Felder-Tafel über die Panels 5,6 und 9 bestimmt (16). Dabei spiegelt die Änderung des V-Slope die Bildung von Exzess-CO₂ aus der Laktatpufferung wieder und bleibt von der Ventilation weitgehend unbeeinflusst, da VE sowohl in $VO_2 = VE(STPD) * (FI-FEO_2)$ wie auch in $VCO_2 = VE (STPD) * FCO_2$ enthalten ist.

Bei der Bestimmung der VT 1 über die V-Slope-Methode ist darauf zu achten, dass an der VT 1 ein Wechsel der Kurvensteigung von <1 auf > 1 stattfindet, der die Abgabe von Exzess CO₂ aus der Laktatpufferung beschreibt. Da zu Beginn der Belastung der RER im Normalfall kleiner 1 ist und unter der Belastung zunächst abfällt ist liegt die VT1 immer bei einer RER < 1.

Mitunter wird im Bereich niedriger Belastungsstufen ein weiterer Knick in der VO₂/VCO₂-Kurve gesehen, der eher ein Anpassungsphänomen widerspiegelt und nicht die genannten Kriterien eines Wechsels der Steigung von <1 auf > 1 erfüllt, so dass er nicht mit der VT 1 gleichzusetzen ist. In der klinischen Medizin – die im Gegensatz zur Sportmedizin das Rampenprotokoll favorisiert - ist aus Erfahrung die V-Slope-Methode zu präferieren.

Demgegenüber empfehlen einige Autoren, dass für sportmedizinische Fragestellungen – neben einer Bevorzugung des Stufenprotokolls - eher die Atemäquivalente als erster Bestimmungsschritt der VTs zu wählen sind (1, 2, 4). Die VT 1 ist dabei definiert durch den Nadir oder Anstieg der VE/VO₂ gegenüber der Belastungsstufe ohne dass ein gleichzeitiger Anstieg von VE/VCO₂ erfolgt (16). Für die Bestimmung der VT 1 über die endexpiratorische Sauerstoffkonzentration ergibt sich analog, dass die VT 1 sich durch den Nadir oder ersten Anstieg der PETO₂ definiert (16). Dabei kann die PETCO₂ konstant bleiben oder ansteigen.

Die Anpassung der Ventilation an die Bildung von Excess-Laktat ist neben weiteren möglichen Faktoren physiologisch vorrangig durch den PaCO₂ und den pH Wert determiniert,

Voraussetzung für die Verwendung der Ventilationssteigerung zur Bestimmung der ventilatorischen Schwelle ist daher ein unbeeinflusster Regelkreis arterielles CO₂ - V'E.

Das ist bei Patienten nicht immer gegeben. Bei schweren pulmonalen Störungen mit ventilatorischer Insuffizienz kann die Ventilation nicht den metabolischen Erfordernissen folgen. Gleiches trifft zu bei zentral bedingter alveolärer Hypoventilation, bzw. Adipositas-Hypoventilations-Syndrom.

Trainierte und insbesondere Leistungssportler weisen über eine längere Phase der Belastung eine permissive Hyperkapnie auf. Dies erschwert die korrekte Bestimmung der VT1 in Panel 6 (Scherhag-Rosenberg, Tim Meyer).

Als beste Lösung zur Bestimmung der VT1 empfehlen Meyer et al. die Anwendung der V-slope-Methode zusammen mit Rampenprotokolle, wenngleich diese sich wiederum als nicht optimal zur gleichzeitigen Bestimmung der Laktatschwellen erweisen.

Bei Normalpersonen stimmen häufig die Kriterien aller 3 Parameter überein. Bei Abweichungen sollte eine Plausibilität für die Festlegung der VT 1 nach einem bestimmten Verfahren hergestellt werden. Bei der Bestimmung der VT sollte demzufolge die Methode angegeben werden, nach der die Bestimmung präferentiell erfolgt ist. Dies kann auch bedeuten, dass die Angabe „manuell“ erfolgt, wenn eine manuelle Korrektur der VT 1 vorgenommen wurde. Für die Bestimmung der VT 1 ist weiterhin wichtig, dass eine gleitende Mittelung der Messwerte über ein Zeitintervall bzw. über 8 – 10 Atemzüge vorliegt. Das Zeitintervall bzw. die Anzahl der erfassten Atemzüge (maximal 15) kann verlängert werden kann, was zu einer Glättung der Kurven führt. Eine Zukunftsperspektive ist der Versuch die 3 genannten Bestimmungsmethoden zu mitteln, da sie sich insbesondere bei Gesunden durch ein höheres Mass an Genauigkeit auszeichnet (10).

Die VT 1 ist als absolut mit der zugehörigen VO₂ anzugeben. Weiterhin sollte ein Bezug auf die Soll-VO₂ (nach Wassermann), die Herzfrequenz und die Belastungsstufe (Watt) bzw. der Leistung (km/h) erfolgen, wenngleich die Angabe von VTs als Absolutwerte verlässlicher ist als die reine Angabe von relativen VO₂-Werten (5).

Die RER ist an der VT 1 immer < 1 . Die RER ist nicht zur Bestimmung der VT 1 geeignet.

Eine Zusammenfassung der VT-Bestimmungsmethoden und der zugehörigen metabolischen Veränderungen findet sich in Abbildung 1.

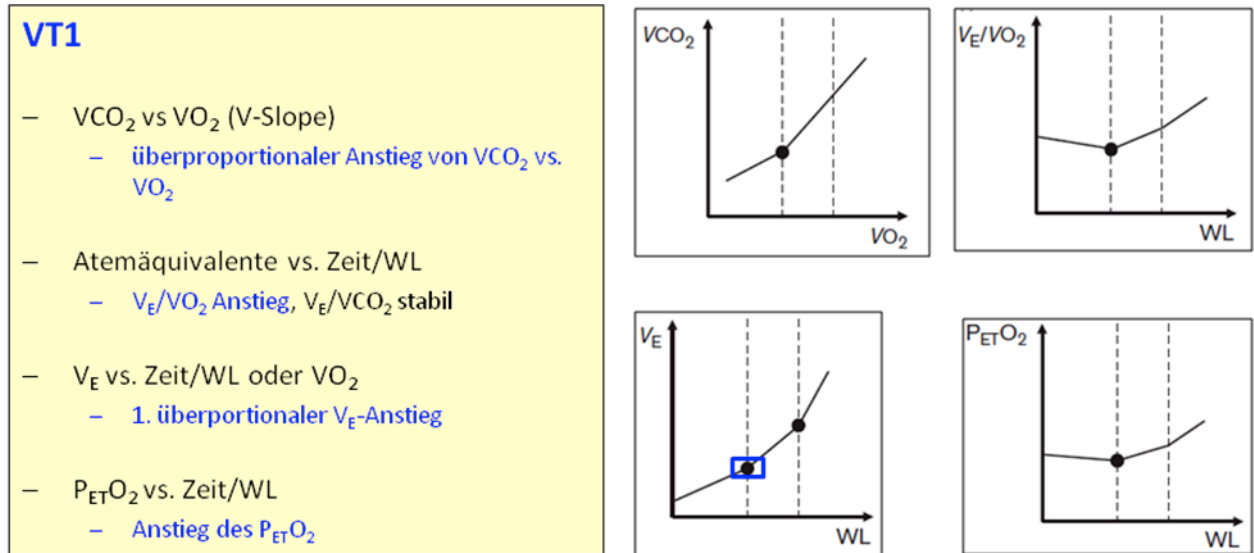


Abbildung 1: VT 1 (konzeptionelle Definition) und deren Bestimmungsmöglichkeiten (operationale Definitionen)

3.2. VT 2

Die VT 2 entspricht dem von Wasserman et al. (18) beschriebenen respiratorischen Kompensationspunkt, der gekennzeichnet ist durch eine überproportionale Ventilation infolge einer zunehmenden metabolische Azidose. Die VT 2 wird über das Verhältnis von V_E zu V_{CO_2} (i.e. V_E/V_{CO_2} -slope), das Atemäquivalent für CO_2 und/oder den $PETCO_2$ bestimmt (16). Dies bedeutet, dass das Atemäquivalent für CO_2 einen Nadir aufweist bzw. ansteigt, die $PETCO_2$ abfällt, ein Anstieg der V_E gegenüber der V_{CO_2} stattfindet und im V-slope (V_{CO_2} vs. VO_2) ein nochmaliger Knick mit einer nachfolgenden Kurvensteigerung von $>> 1$ nachweisbar ist. Für die Bestimmung sind die Panels 4, 6 und 9 der Wasserman 9-Felder-Tafel heranzuziehen. Sofern keine eindeutige Bestimmbarkeit über diese Panels möglich ist, können das Panel 5 und 1 zusätzlich herangezogen werden.

Die Aussagen zur Plausibilität, Benennung der Methode mit der VT 2 bestimmt wird, die Messwertermittlung, Kurvenglättung und Zukunftsperspektiven sind identisch mit den Aussagen zur VT 1. Gleiches gilt für die Bezugsetzung der der VT 2 zugehörigen VO_2 zur Soll- VO_2 , zur Herzfrequenz und Belastungsstufe (Watt) bzw. Leistung (km/h).

Eine Zusammenstellung der Definitionen und Bestimmungsmethoden findet sich in Abbildung 2.

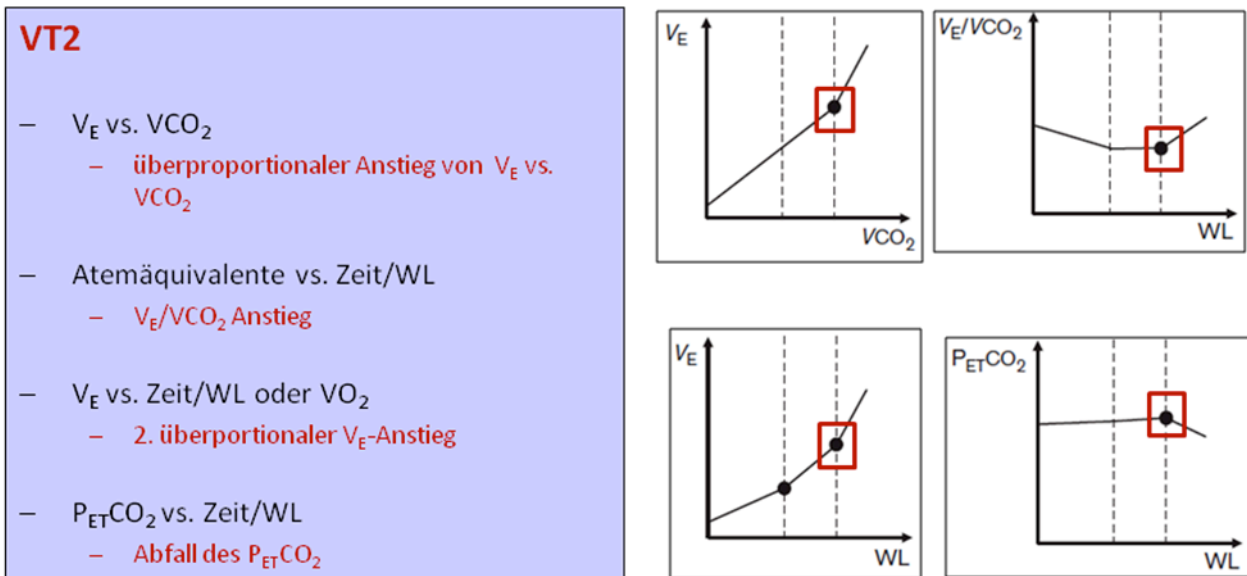


Abbildung 2: VT 2 (konzeptionelle Definition) und deren Bestimmungsmöglichkeiten (operationale Definitionen)

4. Ausblick

Für die Spiroergometrie ist eine Harmonisierung der Terminologie sinnvoll. Deshalb kann eine klare Sprachregelung für die ventilatorischen und Laktatschwellen ein erster Schritt in Richtung Standardisierung von Nomenklaturen sein. Sie kann als Basis für Studien und Testprotokolle sowie deren Vergleichbarkeit dienen.

Dabei erscheint es wichtig, zwischen einer konzeptionellen und operationalen (methodischen) Schwellenbetrachtung zu unterscheiden. Das Schwellenkonzept bedeutet, dass es zwei ventilatorische (VT 1 und VT 2) und zwei Laktatschwellen (LT 1 und LT 2) gibt. Diese Schwellen sind pathophysiologisch erklärbar. Demgegenüber beinhaltet das operationale Schwellenkonzept die Methode mit der die jeweilige Schwelle bestimmt wird. Dies kann in einem weiteren Schritt noch ergänzt werden durch die Angabe der Belastungsform, die zur Schwellenbestimmung herangezogen wurde.

Bei klarer Begrifflichkeit mit Angabe des Schwellenkonzepts, der Bestimmungsmethode und der Belastungsform ist auch eine exaktere Beratung bezüglich Trainingsplanung im Bereich von Sportmedizin und Rehabilitationsmedizin möglich.

Dieser formale Prozess ist zukünftig mit weiteren Evidenzen zu unterfüttern.

Literatur:

1. Amann M, Subudhi AW, Walker J, Eisenman P, Shultz B, Foster C. An evaluation of the predictive validity and reliability of ventilatory threshold. *Med Sci Sports Exerc.* 2004 Oct;36(10):1716-22.
2. Amann M, Subudhi AW, Foster C. Predictive validity of ventilatory and lactate thresholds for cycling time trial performance. *Scand J Med Sci Sports.* 2006 Feb;16(1):27-34.
3. Faude O, Kindermann W, Meyer T. Lactate threshold concepts: how valid are they? *Sports Med.* 2009;39(6):469-90
4. Amann M, Subudhi A, Foster C. Influence of testing protocol on ventilatory thresholds and cycling performance. *Med Sci Sports Exerc.* 2004 Apr;36(4):613-22.
5. Weston SB, Gabbett TJ. *J Sci Med Sport.* 2001 Sep;4(3):357-66. Reproducibility of ventilation of thresholds in trained cyclists during ramp cycle exercise.
6. Hughes EF, Turner SC, Brooks GA. Effects of glycogen depletion and pedaling speed on "anaerobic threshold". *J Appl Physiol.* 1982 Jun;52(6):1598-607.
7. Loat CE, Rhodes EC. Relationship between the lactate and ventilatory thresholds during prolonged exercise. *Sports Med.* 1993 Feb;15(2):104-15.
8. Myers J, Ashley E. Dangerous curves. A perspective on exercise, lactate, and the anaerobic threshold. *Chest.* 1997 Mar;111(3):787-95.
9. Hopker JG, Jobson SA, Pandit JJ.
Controversies in the physiological basis of the 'anaerobic threshold' and their implications for clinical cardiopulmonary exercise testing. *Anaesthesia.* 2011 Feb;66(2):111-23
10. Gaskill SE, Ruby BC, Walker AJ, Sanchez OA, Serfass RC, Leon AS. Validity and reliability of combining three methods to determine ventilatory threshold. *Med Sci Sports Exerc.* 2001 Nov;33(11):1841-8.

11. Chicharro JL, Pérez M, Vaquero AF, Lucía A, Legido JC. Lactic threshold vs ventilatory threshold during a ramp test on a cycle ergometer. *J Sports Med Phys Fitness*. 1997 Jun;37(2):117-21.
12. Mader A, Liesen H, Heck H, Philippi H, Rost R. Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. *Dtsch Z Sportmed* 1976; 27:80–112.
13. Wasserman K, Whipp BJ, Koysl SN, Beaver WL. Anaerobic threshold and respiratory gas exchange during exercise. *J Appl Physiol* 1973; 35: 236–243
14. McLellan TM. Ventilatory and plasma lactate response with different exercise protocols: a comparison of methods. *Int J Sports Med* 1985; 6:30–35.
15. Davis JA, Vodak P, Wilmore JH, Vodak J, Kurtz P. Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. *J Appl Physiol* 1976; 41:544–550.
16. Binder RK, Wonisch M, Corra U, et al. Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. *European Journal of Cardiovascular Prevention and Rehabilitation* 2008; 15: 726 – 734
17. Roecker K, Prettin S, Pottgiesser T, Schumacher YO, Dickhuth HH. Metabolische Leistungs-Diagnostik und Trainingssteuerung in der Sportmedizin. *Sportmed präventivmed* (2010); 40/1: 6- 12
18. Whipp BJ, Ward SA, Lamarra N, Davis JA, Wasserman K. Parameters of ventilator and gas exchange dynamics during exercise. *J Appl Physiol* 1982; 52: 1506 – 1513
19. Thomas V, Costes F, Chatagnon M, Pouilly JP, Busso T. A comparison of lactate indices during ramp exercise using modeling techniques and conventional methods. *Journal of Sports Sciences* 2008; 26: 1387 – 1395

20. Heck H, Beneke R. 30 Jahre Laktatschwellen – was bleibt zu tun? Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 2008; 12: 297 – 302
21. Beneke R, Leithäuser R, Ochentel O. Blood lactate diagnostics in exercise testing and training. International Journal of Sports, Physiology and Performance 2011; 6: 8 – 24
22. Skinner J., McLellan H.: The transition from aerobic to anaerobic metabolism. Res. Q. Exercise Sport 1980; 50: 234-248
23. Farrell P.A., Wilmore J.H., Coyle E.F., Billing J.E., Costill D.L. Plasma lactate accumulation and distance running performance. Medicine and Science in Sports and Exercise 1979; 11 338 – 344
24. Dörr, C. (2010). Untersuchung der Validität verschiedener Laktatschwellenkonzepte an Ausdauersportlern. Unveröffentlichte Dissertation, Gießen: Justus-Liebig-Universität Gießen.
25. Hottenrott, K., & Neumann, G. (2008). Methodik des Ausdauertrainings (Vol. 165). Schorndorf: Hofmann.
26. Hollmann W.: Die ärztliche Beurteilung der körperlichen Höchst- und Dauerleistungsfähigkeit. Die Umschau in Wissenschaft und Technik 22 1961: 689-692
- 27.. Scharhag-Rosenberger F. Spiroergometrie zur Ausdauerleistungsdiagnostik. Dtsch Z Sportmed 2010; 61:146-147.
28. Meyer T., Lucia A., Earnest C.P., Kindermann W. A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters – theory and application Int J Sports Med 2005; 26(Suppl 1) S38-S48
29. Kindermann W. Anaerobe Schwelle. Dtsch Z Sportmed 2004; 55:161-162.
30. Keul J., Simon G., Berg A., Dickhuth H.-H., Goerttler I., Kubel R.: Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin 7 1979: 212-218

31. Stegmann H., Kindermann W., Schnabel A.: Lactate kinetics and individual anaerobic threshold. *International Journal of Sports Medicine* 2 (3) 1981: 160-165
32. Wasserman K., McIlroy M.B.: Detecting the threshold of anaerobic metabolism in cardiac patients during exercise. *American Journal of Cardiology* 14 1964: 844-852
33. Simon G., Berg A., Dickhuth H.-H., Simon-Alt A., Keul J.: Bestimmung der anaeroben Schwelle in Abhängigkeit vom Alter und von der Leistungsfähigkeit. *Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin* 1 1981: 7-14
34. Dickhuth H.-H., Huonker M., Munzel T., Drexler H., Berg A., Keul J.: Individual anaerobic threshold for evaluation of competitive athletes and patients with left ventricular dysfunctions. In: Bachl., Graham T.E., Lollgen H. (Hrsg.): *Advances in ergometry*. Springer. Berlin, Heidelberg, New York 1991: 173-179
35. Svedahl K, MacIntosh BR.: Anaerobic threshold: the concept and the methods of measurement. *Can J Appl Physiol* 2003; 28: 299 – 323
36. Antonutto, Di Prampero PE.: The concept of lactate threshold. A short review. *J Sport Med Phys Fitness* 1995; 35: 6 - 12